МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 539.42, 539.375
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-227-237

Оригинальное эмпирическое исследование

EDN: AICZHY

Исследование процессов эволюции дефектов структуры мелкозернистых бетонов методами компьютерной томографии

А.В. Пузатова ✉, **М.А. Дмитриева**, **А.О. Товпинец**, **В.Н. Лейцин**
Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Российская Федерация
✉ a.v.puzatova@gmail.com

Аннотация
Введение. При изучении композиционных материалов строительного назначения актуальными являются исследования механизмов формирования структуры и свойств современных бетонов в процессе набора прочности. В исследованиях современных композиционных материалов на цементном вяжущем отсутствуют сведения о развитии дефектов структуры и разрушении материала на начальных сроках набора прочности. Такие сведения можно получить с помощью рентгеновской компьютерной томографии — перспективного метода неразрушающего контроля состояния материала. Поэтому целью данной работы явилось изучение образования и распространения трещин в образцах мелкозернистого бетона с различным фракционным составом песка вследствие естественных процессов усадки цементного камня, а также механики разрушения образцов модифицированного мелкозернистого бетона при приложении сжимающей нагрузки на ранних сроках набора прочности.
Материалы и методы. В исследовании использовались мелкозернистые бетонные смеси трех композиций с различным гранулометрическим составом песка. Образцы для томографии были изготовлены путем помещения свежих смесей в полимерные цилиндрические контейнеры. Томография образцов сразу после изготовления, а также через 8 и 51 сутки проводилась в микрофокусной рентгеновской установке YXLON Cheetah. Состав с двухфракционным песком был модифицирован механической активацией компонентов, изготовлены образцы-кубики 20×20×20 мм. Далее на установке Instron проведены испытания на сжатие через 3 и 7,5 часов и затем — томография разрушенных образцов.
Результаты исследования. Установлено, что разрушение контактных зон зависит от отношения размеров фракций. В присутствии большого количества крупных частиц песка в теле бетона разрушение контактных зон более выражено и имеет магистральный характер. При использовании мелкого или полифракционного песка контактные зоны разрушаются локально и имеют визуально меньшую площадь. На изображениях разрушенного модифицированного образца, испытанного через три часа после изготовления, прослеживаются четкие трещины и выколы на гранях, что говорит об упруго-пластическом характере разрушения. Через 7,5 часов грани образца при разрушении покрываются сеткой мелких трещин, внутри образца также образуется множество трещин и микротрещин, что свидетельствует о хрупком разрушении. По полученным изображениям деформированной структуры модифицированного бетона наглядно прослеживается механизм перехода от упруго-пластического разрушения материала к хрупкому.
Обсуждение и заключение. Изученные зависимости влияния размеров мелкого заполнителя на механизмы образования и распространения дефектов структуры вносят вклад в теорию процессов разрушения мелкозернистых бетонов. Полученные результаты доказывают перспективность применения рентгеновской компьютерной томографии как метода неразрушающего контроля внутренней структуры мелкозернистого бетона, в том числе на ранних сроках набора прочности.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная томография, мелкозернистый бетон, деформация, упруго-пластическое разрушение, хрупкое разрушение

Механика

© Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Товпинец А.О., Лейцин В.Н., 2024

Благодарности. Авторы выражают благодарность Шиняевой Марии Владимировне, Когай Алине Дмитриевне за помощь в приготовлении образцов композиционных материалов для проведения исследований структуры на рентгеновском компьютерном томографе.

Для цитирования. Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Товпинец А.О., Лейцин В.Н. Исследование процессов эволюции дефектов структуры мелкозернистых бетонов методами компьютерной томографии. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):227–237. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-227-237

Original Empirical Research

Study of Structural Defects Evolution in Fine-Grained Concrete Using Computed Tomography Methods

Anastasiia V. Puzatova ✉, **Maria A. Dmitrieva**, **Alexandr O. Tovpinets**, **Vladimir V. Leitsin**
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation
✉ a.v.puzatova@gmail.com

Abstract
Introduction. When studying composite materials for construction purposes, it is needed to consider the mechanisms of formation of the structure and properties of modern concretes in the process of strength development. In studies of modern composite materials based on cement binder, there is no information about the development of structural defects and destruction of the material at the initial stages of strength development. This information can be obtained using X-ray computed tomography, a promising method of nondestructive testing of the state of the material. Therefore, the objective of this work was to study the formation and propagation of cracks in samples of fine-grained concrete with different fractional composition of sand due to natural processes of cement shrinkage, as well as the mechanics of destruction of samples of modified fine-grained concrete when applying a compressive load at the early stages of strength development.
Materials and Methods. The study used fine-grained concrete mixtures of three compositions with different sand gradation. The tomography samples were made by placing fresh mixtures in polymer cylindrical containers. Tomography of the samples immediately after manufacture, as well as after 8 and 51 days, was performed in a YXLON Cheetah microfocus X-ray machine. The composition with two-fraction sand was modified by mechanical activation of the components, 20×20×20 mm cube samples were made. Further, compression tests were performed at the Instron installation after 3 and 7.5 hours, and then — tomography of the destroyed samples.
Results. It was established that the destruction of contact zones depended on the ratio of the size of the fractions. In the presence of a bulk of coarse sand grains in concrete, the destruction of contact zones was more pronounced and had a main mode. When using fine or polyfraction sand, contact zones were destroyed locally and had a visually smaller area. The images of the destroyed modified sample, tested 3 hours after manufacturing, showed clear cracks and indents on the edges, which indicated the elastic-plastic nature of the destruction. In 7.5 hours, the edges of the sample upon destruction were covered with a network of small cracks; inside the sample there were also numerous cracks and microcracks, which indicated brittle fracture. Based on the obtained images of the deformed structure of modified concrete, the mechanism of transition from elastic-plastic destruction of the material to brittle one was clearly visible.
Discussion and Conclusion. The studied dependences of the influence of the size of fine aggregate on the mechanisms of formation and propagation of structural defects contribute to the theory of the processes of destruction of fine-grained concretes. The results obtained prove the prospects of using X-ray computed tomography as a method of nondestructive testing of the internal structure of fine-grained concrete, including at the early stages of strength development.

Keywords: X-ray computed tomography, fine-grained concrete, deformation, elastic-plastic failure, brittle fracture

Acknowledgements. The authors would like to thank Maria Vladimirovna Shiryaeva, Alina Dmitrievna Kogai for their help in preparing samples of composite materials for conducting structural studies on an X-ray computed tomograph.

For Citation. Puzatova AV, Dmitrieva MA, Tovpinets AO, Leitsin VN. Study of Structural Defects Evolution in Fine-Grained Concrete Using Computed Tomography Methods. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):227–237. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-227-237

Введение. Рентгеновская компьютерная томография — перспективный метод неразрушающего контроля состояния материала. В бетонной промышленности томография пригодна для определения структуры образцов бетона, микротрещин, внутренних разрушений, исследования распределения пор и частиц заполнителя. Рентгеновская компьютерная томография обеспечивает построение модели микроструктуры цементной пасты, позволяет исследовать развитие процессов гидратации цемента [1, 2], строить прогнозы формирования механических характеристик и условий разрушения [3, 4]. Компьютерная томография активно используется для изучения средней

плотности и пористости высокопрочных легких бетонов [5], исследования структуры конструкционно-теплоизоляционного бетона [6], построения мезомасштабной 3D-модели пенобетона [7], образования и распределения пор в легком бетоне [8], анализа микроструктурных характеристик образцов бетона с различными заполнителями [9, 10], разработки трехмерных мезомасштабных моделей для построения сетки конечных элементов при моделировании структуры бетона [11, 12]. В сравнении со стандартными 2D методами рентгенографии, построение 3D-моделей образцов многокомпонентных бетонов являются перспективными для исследования фундаментальных механизмов формирования структуры и свойств современных бетонов.

Наиболее уязвимым участком мелкозернистых бетонов при нагружении является контактная зона — участки контакта цементного камня и заполнителей. При воздействии внешних нагрузок именно с этих участков начинается формирование микродефектов и микротрещин, развитие которых ведет к образованию дефектов на макроуровне, что может привести к потере несущей способности и разрушению конструкции. Разрушение контактных зон происходит из-за различия характеристик граничащих компонентов (модуля Юнга, коэффициента Пуассона, коэффициента линейного термического расширения, размеров контактирующих фаз, микродефектов на поверхности раздела фаз) [13]. Метод рентгеновской компьютерной томографии перспективен для изучения эволюции контактных зон, в том числе на ранних стадиях гидратации, так как позволяет изучать структуру без разрушения образца непосредственно в процессе твердения. Контактные зоны, как правило, имеют более высокую пористость и низкую прочность, вследствие чего именно в этих зонах образуются трещины [4]. На прочность контактных зон также влияет размер заполнителя. Установлено, что в бетонах с комбинированными заполнителями (крупной фракции и дроблеными) формируются однородные и более прочные контактные зоны [14]. Имеется множество современных исследований формирования контактных зон цементного камня с арматурой [15], трещин в крупнопористом бетоне [16], дефектов на границе контакта цементно-песчаного раствора с крупным заполнителем [17], но, наряду с этим, формирование контактных зон в мелкозернистых бетонах с различной крупностью и плотностью упаковки зерен песка слабо изучено. В современной научной литературе отсутствует описание влияния размера мелкого заполнителя на формирование дефектов контактных зон в мелкозернистых бетонах. Таким образом, изучение образования дефектов структуры мелкозернистого бетона, содержащего песок различного фракционного состава, с получением наглядной картины распространения трещин методом рентгеновской компьютерной томографии является актуальным.

Для снижения напряжений, возникающих в контактных зонах, используются микронаполнители, схожие по своим свойствам с цементным камнем. Такие наполнители, имеющие повышенную удельную поверхность, создают дополнительные контактные зоны, между которыми перераспределяются напряжения, возникающие вследствие твердения вяжущего. Упрочнения контактных зон можно добиться введением механоактивированных компонентов в бетонную смесь [13]. Механическая активация отдельных компонентов способствует формированию более плотной структуры, приданию однородности составу, развитию начальной прочности вследствие ускорения реакции гидратации и роста кристаллогидратов цементного камня, а также сокращению сроков схватывания [18, 19]. Развитие дефектов структуры в мелкозернистых бетонах, модифицированных механической активацией компонентов, также слабо изучено. Среди современных научных исследований крайне мало работ, посвященных исследованию процессов распространения трещин в модифицированной структуре мелкозернистых бетонов на начальных сроках набора прочности. Следовательно, применение метода компьютерной томографии для изучения механики разрушения образцов модифицированного мелкозернистого бетона на начальных сроках твердения является актуальным.

Целью данной работы являлось изучение образования и распространения трещин в образцах мелкозернистого бетона с различным фракционным составом песка вследствие естественных процессов усадки цементного камня, а также механики разрушения образцов модифицированного мелкозернистого бетона при приложении сжимающей нагрузки на ранних сроках набора прочности.

Материалы и методы. В исследовании по определению дефектов контактных зон мелкозернистых бетонов с различным гранулометрическим составом песка использовались три образца мелкозернистой бетонной смеси следующих составов:

– состав № 1: портландцемент Евроцем 500 супер; ЦЕМ I 42.5 Н (ООО «Петербург цемент»); песок монофракционный (фракция 0,63–0,315 мм); вода. Соотношение компонентов смеси — 1:2,56:0,67;

– состав № 2: портландцемент Евроцем 500 супер; ЦЕМ I 42.5 Н (ООО «Петербург цемент»); песок полифракционный строительный по ГОСТ 8736–2014 с МК = 1,85; вода. Соотношение компонентов смеси — 1:2,56:0,67;

– состав № 3: портландцемент Евроцем 500 супер; ЦЕМ I 42.5 Н (ООО «Петербург цемент»); песок двухфракционный (фракция 2,5–1,25 мм — 80 % от общей массы песка, фракция 0,63–0,315 мм — 20 % от общей массы песка; отсутствует промежуточная фракция 1,25–0,63 мм); высокоактивный метакаолин (белый) (производства ГК «Синерго», Челябинская область); микрокремнезем; вода. Соотношение компонентов смеси — 1:1,75:0,43:0,23:0,15:0,67.

Свежезамешанные составы мелкозернистой бетонной смеси были помещены в полимерный цилиндрический контейнер диаметром 8 мм и длиной около 70 мм. Диаметр контейнера был определен в соответствии с размером исходных компонентов мелкозернистого бетона указанных ранее составов на основе условий представительности [20] и репрезентативности исследуемого объема. Для отслеживания изменений структуры в процессе гидратации цемента и усадки цементного камня, томография образцов была сделала сразу после смешивания компонентов и спустя 8 суток твердения. За конечный результат приняты образцы в возрасте 51 суток.

В исследовании по эволюции механизма образования трещин в процессе разрушения образцов под действием внешней сжимающей силы использовался состав № 3 с двухфракционным песком, модифицированный путем механической активации композиции цемента и песка. Механическая активация компонентов (цемента и песка) проводилась с использованием высокоскоростной шаровой мельницы Retsch EMax. Измельчение компонентов происходило при скорости вращения чаш аппарата 750 об/мин в течение 5 минут.

Из бетонных растворов были изготовлены образцы кубической формы размерами 20×20×20 мм, к которым была приложена внешняя сжимающая нагрузка через 3 и 7,5 часов. После приложения нагрузки были сделаны томографии разрушенных образцов с целью прослеживания эволюции характера разрушения материала.

Структура образцов бетона была изучена с использованием микрофокусного рентгеновского компьютерного томографа YXLON Cheetah с конфигурацией Y. Cheetah. Характеристики прибора указаны в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики томографа YXLON Cheetah

Характеристика	Значение
Рентгеновская трубка	Открытого типа
Диапазон рабочих напряжений, кВ	25–160
Диапазон рабочих токов, мА	0,1–1
Максимальная мощность трубки, Вт	64
Максимальная мощность трубки на мишени, Вт	15
Угол наклона детектора	±70° (сектор 140°)
Увеличение (геометрическое/максимальное)	2000x / 17500x
Максимальные размеры образца, мм	800×500
Время от загрузки образца до получения первого изображения, сек	<10
Время полноценной томографии образца, сек	7
Время послойного исследования образца, сек	20
Габаритные размеры, мм	1650×1400×1850
Масса, кг	2200

С позиции микромеханики композиционных материалов оценка эффективных характеристик может быть представлена наборами свойств представительного объема исследуемого тела. Исследуемый образец для томографии должен отвечать представительному объему материала, который имеет смысл элементарного макрообъема микронеоднородной среды.

Во время эксперимента, после прохождении рентгеновских лучей через образец получается набор плоских рентгеновских изображений с неравномерным распределением серости на снимках. Это связано с неравномерным поглощением рентгена компонентами исследуемого материала — наличием пор, дефектов, плотных включений и пр. После реконструкции 3D изображений образца градиент серости инвертирован относительно обычных рентгеновских снимков: материалам, наиболее прозрачным для рентгеновских лучей, например, порам, соответствует черный цвет, а максимально плотному материалу — белый. Плотность серости в полноцветном представлении рассматривается в диапазоне 0–255, где 0 — отвечает черному цвету, а 255 — белому. Данный алгоритм служит для определения минимального размера признаков, которые можно было бы дифференцировать как структурные компоненты исследуемого образца: пористость, цементный раствор и заполнитель в объеме. Далее с помощью данной градации серости, выделяя те или иные числовые диапазоны, можно анализировать отдельную внутреннюю структуру, распределение компонентов и пористости [21].

Параметры съемки для всех исследуемых образцов оставались постоянными: напряжение — 85 кВт; ток — 45 μA; приближение — 8,9; угол сканирования — 360°. Результаты съемки представляют собой 1024 последовательных изображения внутренней структуры образцов. Дальнейшая обработка полученного массива двумерных изображений происходила в программе «Volume Graphics Studio». Для улучшения визуализации включений была проведена работа по редактированию послойных изображений по уровням яркости и контрастности. Итогом томографии явилась 3D-модель образца и трех его проекций с возможностью изучения внутренней структуры в любом сечении.

Результаты исследования. Изображения внутренней структуры образцов состава № 1 с монофракционным песком (фракция 0,63–0,315 мм) в возрасте 0,8 и 51 суток, полученные с помощью рентгеновской томографии, представлены на рис. 1. Наименьшей плотностью обладают самые темные участки на изображениях, в данном случае — поры. Наиболее твердые частицы соответствуют самым светлым участкам.

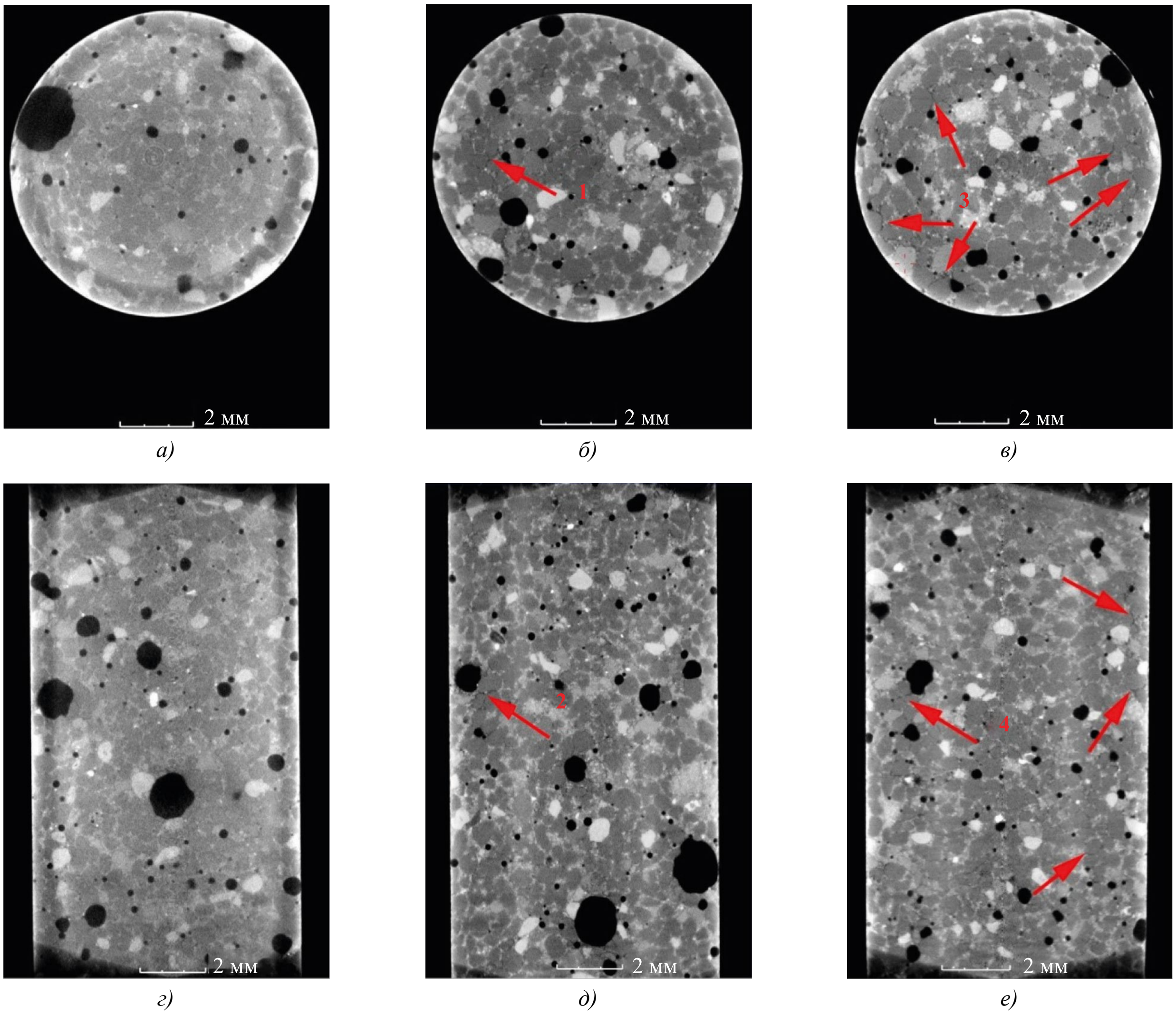
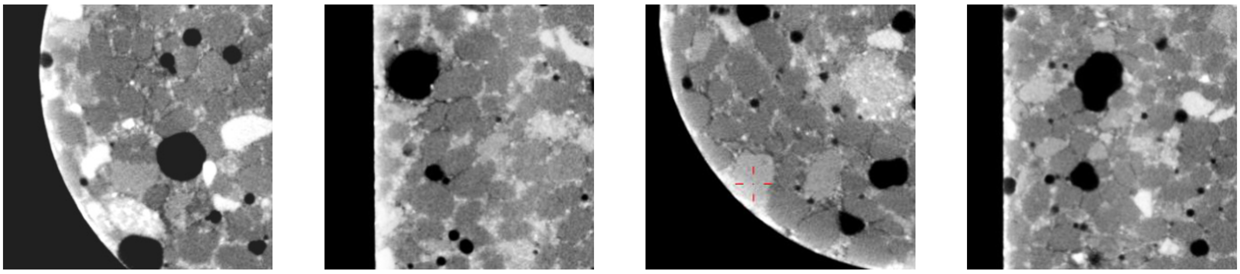


Рис. 1. Внутренняя структура образца № 1 (монофракционный песок):
а, г — сразу после приготовления; *б, д* — в возрасте 8 сут.; *в*, *е* — в возрасте 51 сут.

На изображениях внутренней структуры образца состава № 1 с монофракционным песком сразу после замешивания смеси не отмечается изменений в контактных зонах. К 8 и 51 суткам твердения вокруг отдельных зерен песка просматриваются полоски темного цвета (указаны красными стрелками), соответствующие пустотам, которые образуются вследствие усадки цементного камня. Причем с ростом возраста бетона таких пустот вокруг зерен песка визуально становится больше. Увеличенные изображения отдельных трещинообразных пустот представлены на рис. 2.

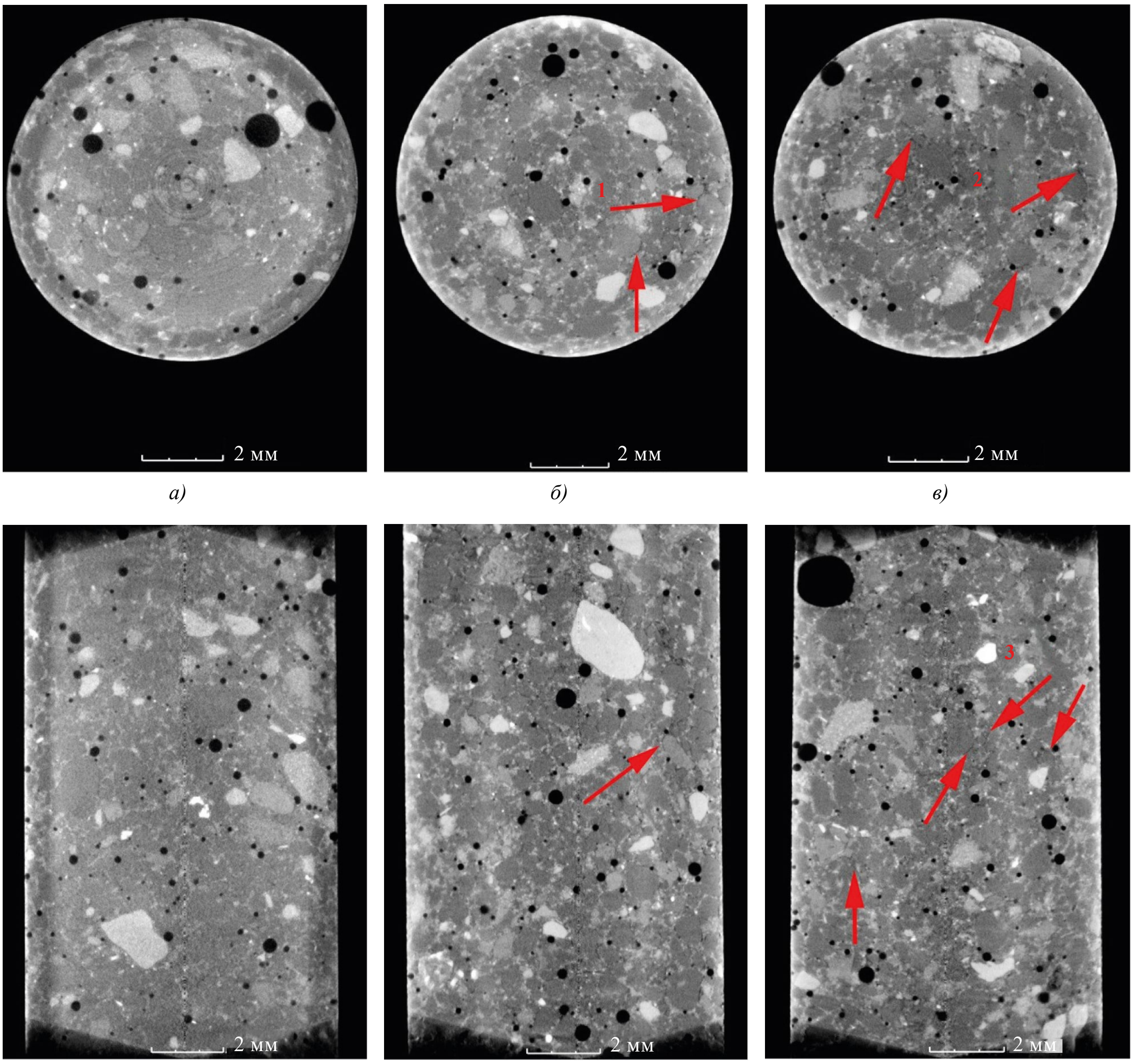


а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 2. Увеличенные фрагменты рис. 1:
а — фрагмент 1; *б* — фрагмент 2; *в* — фрагмент 3; *г* — фрагмент 4

На фрагментах 3 и 4, соответствующих образцу № 1 в 51 суточном возрасте, характер проявления дефектов контактных зон вокруг частиц песка наиболее выраженный. Это подтверждается тем, что к 51 суткам процесс усадки цементного камня практически завершен, тогда как в возрасте 8 суток усадка находится в активной фазе.

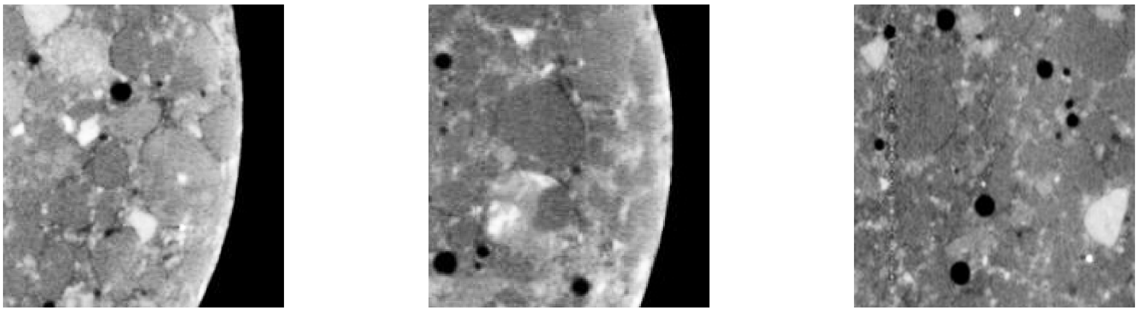
Изображения внутренней структуры образцов состава № 2 с полифракционным песком в возрасте 0, 8 и 51 суток представлены на рис. 3. Отдельные увеличенные фрагменты представлены на рис. 4.



а) *б)* *в)*

г) *д)* *е)*

Рис. 3. Внутренняя структура образца № 2 (полифракционный песок):
а, г — сразу после приготовления; *б, д* — в возрасте 8 сут.; *в*, *е* — в возрасте 51 сут.

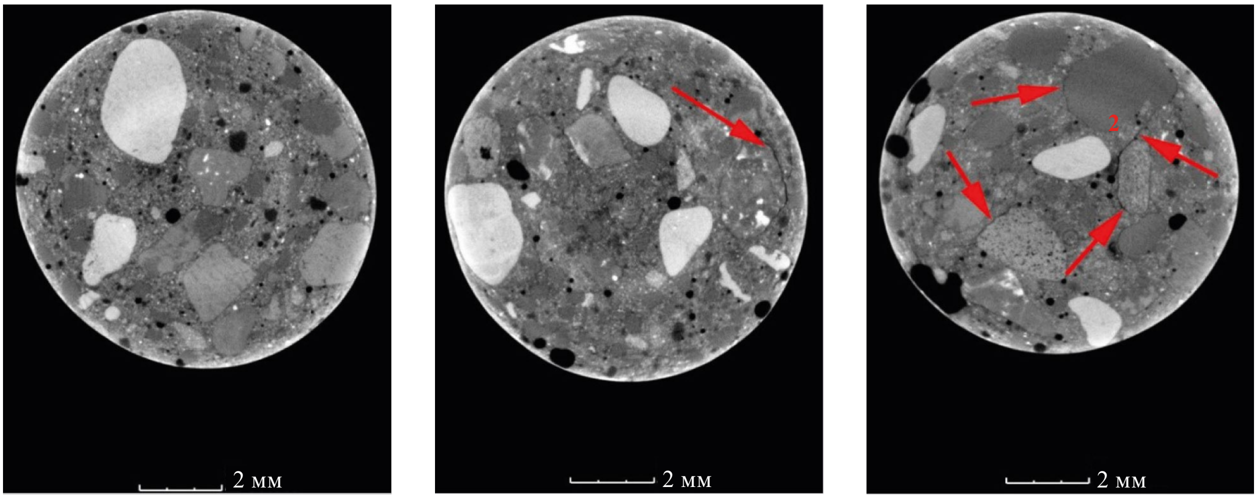


а) *б)* *в)*

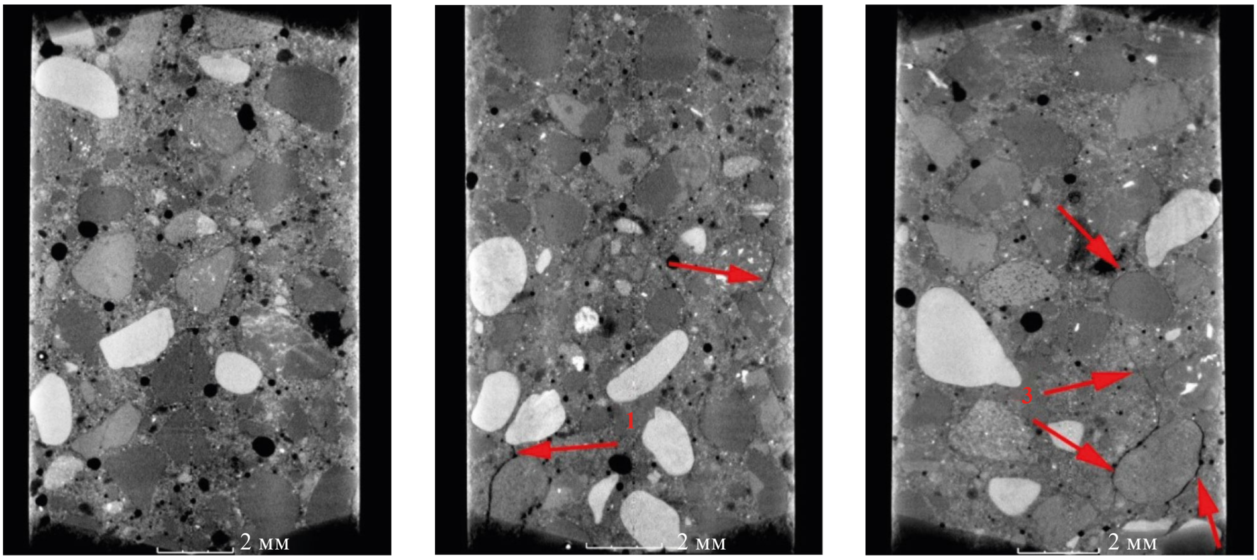
Рис. 4. Увеличенные фрагменты рис. 3:
а — фрагмент 1; *б* — фрагмент 2; *в* — фрагмент 3

Развитие дефектов контактных зон образцов состава № 2 с полифракционным заполнителем так же, как у состава № 1 с монофракционным, проявляется к 8 суткам твердения, количество дефектных участков увеличивается к 51 суткам. Можно отметить, что разрушения контактных зон вокруг отдельных крупных частиц песка не наблюдается.

Изображения внутренней структуры образцов состава № 3 с двухфракционным песком (фракции 2,5–1,25 мм и 0,63–0,315 мм, отсутствует промежуточная фракция) в возрасте 0, 8 и 51 дня представлены на рис. 5.



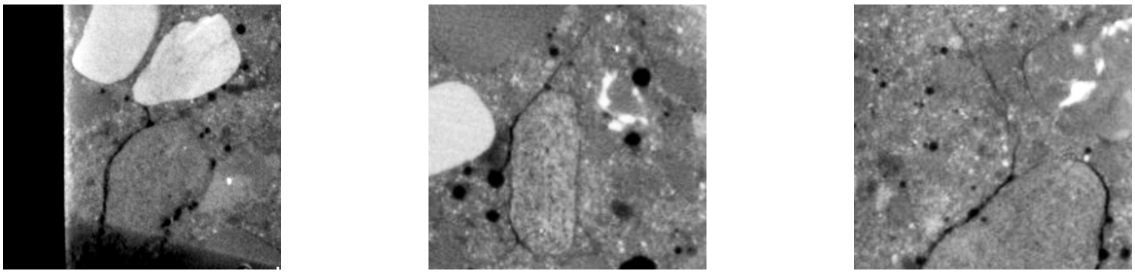
а) *б)* *в)*



г) *д)* *е)*

Рис. 5. Внутренняя структура образца № 3 (двухфракционный песок):
а, г — сразу после приготовления; *б, д* — в возрасте 8 сут.; *в*, *е* — в возрасте 51 сут.

На изображениях внутренней структуры образцов, содержащих две фракции песка, в возрасте 8 и 51 суток наблюдается отчетливое образование трещин вокруг крупных зерен песка, причем прослеживается магистральный характер образования трещин, когда трещины соединяются между собой (рис. 6).



а) *б)* *в)*

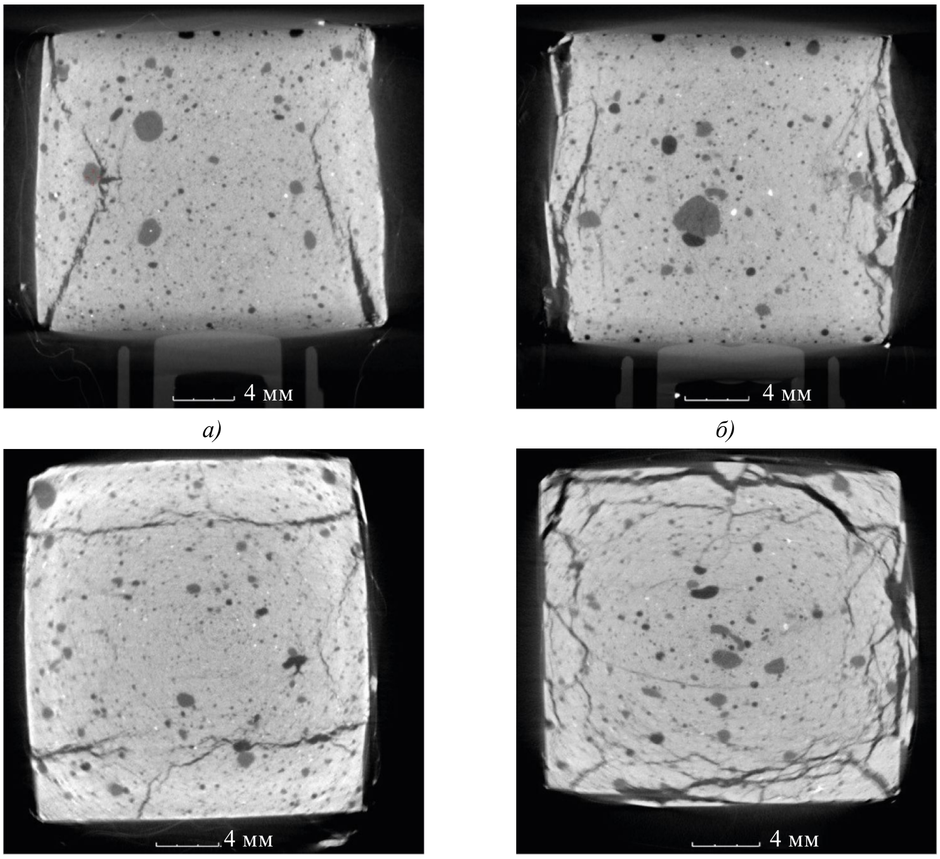
Рис. 6. Увеличенные фрагменты рис. 5:
а — фрагмент 1; *б* — фрагмент 2; *в* — фрагмент 3

Механика

Образование магистральных трещин вблизи крупных зерен песка свидетельствует о том, что контактные зоны вокруг крупных частиц заполнителя наиболее напряжены и подвержены разрушению в процессе усадки цементного камня.

По полученным изображениям внутренней структуры образцов с различной крупностью песка можно заключить, что развитие дефектов контактных зон вследствие усадки цементного камня зависит от соотношения размеров фракций. В образцах с моно- и полифракционным песком дефектная структура развивается локально, площадь таких дефектов визуально намного меньше, чем в образцах с двумя различными по размеру фракциями. В присутствии крупной фракции песка высокой объемной концентрации дефекты контактных зон развиваются вблизи крупных зерен и имеют магистральный характер.

Образцы-кубики состава № 3 с двухфракционным песком, модифицированные механической активацией отдельных компонентов, были подвержены приложению внешней сжимающей нагрузки в возрасте 3 и 7,5 часов после приготовления. Изображения деформированной внутренней структуры образцов представлены на рис. 7.



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 7. Изображения внутренней структуры модифицированных образцов:
а — фронтальное сечение в возрасте 3 часов; *б* — фронтальное сечение в возрасте 7,5 часов;
в — горизонтальное сечение в возрасте 3 часов; *г* — горизонтальное сечение в возрасте 7,5 часов

На изображениях наблюдается эволюция от упруго-пластического к хрупкому разрушению образцов твердеющего бетона. Образцы, испытанные через 3 часа после изготовления, имеют упруго-пластический характер разрушения, прослеживаются четкие трещины и выколы на гранях образца. В возрасте 7,5 часов грани образца при разрушении покрываются сеткой мелких трещин, внутри образца также имеется множество трещин и микротрещин, что свидетельствует о хрупком разрушении.

Обсуждение и заключение. Посредством механических испытаний и рентгеновской компьютерной томографии имеется возможность отслеживания процессов разрушения в структуре мелкозернистого бетона. Полученные результаты дают развитие новому комплексному методу оценки структурных характеристик модифицированного мелкозернистого бетона на всех этапах набора прочности. Установлено, что разрушение контактных зон зависит от отношения размеров фракций. В присутствии большого количества крупных частиц песка в теле бетона разрушение контактных зон более выражено и имеет магистральный характер. При использовании мелкого или полифракционного песка контактные зоны разрушаются локально и имеют визуально меньшую площадь. Это свидетельствует о том, что контактные зоны вблизи крупных частиц заполнителя наиболее напряжены и в первую очередь подвержены разрушению в процессе усадки цементного камня.

Изученные зависимости влияния размеров мелкого заполнителя на механизмы образования и распространения дефектов структуры вносят вклад в теорию процессов разрушения мелкозернистых бетонов. Полученные результаты доказывают перспективность применения рентгеновской компьютерной томографии как метода неразрушающего контроля внутренней структуры мелкозернистого бетона, в том числе на ранних сроках набора прочности. Компьютерная томография, наряду с традиционными методами исследования структуры и свойств строительных материалов, дает развитие новому комплексному методу, позволяющему изучать современные многокомпонентные бетоны на всех стадиях набора прочности, механизмы образования и развития дефектов структуры ввиду естественных процессов изменения состояния материала и при различных режимах внешнего нагружения.

Список литературы / References

1. Дмитриева М.А., Когай А.Д., Лейцин В.Н., Товпинец А.О., Шиняева М.В. Экспериментально-теоретический подход оценки структуры мелкозернистых модифицированных бетонов. *Вестник МГСУ*. 2023;18(1):70–81. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.1.70-81

Dmitrieva MA, Kogai AD, Leitsin VN, Tovpinets AO, Shinyaeva MV. An Experimental and Theoretical Approach to Assessing the Structure of Fine-Grained Modified Concretes. *Vestnik MGSU*. 2023;18(1):70–81. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.1.70-81

2. Дмитриева М.А., Шаранова А.В., Лейцин В.Н., Шиняева М.В. Экспериментальные исследования эволюции структурно-механических характеристик цементного камня в процессе гидратации. В: *Труды III Международной конференции «Современные строительные материалы и технологии»*. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта; 2021. С. 7–13.

Dmitrieva MA, Sharanova AV, Leitsin VN, Shinyaeva MV. Experimental Studies of the Evolution of Structural and Mechanical Characteristics of Cement Stone in the Process of Hydration. In: *Proc. III International Conference "Advanced Building Materials and Technologies"*. Kaliningrad: IKBFU Publ.; 2021. P. 7–13. (In Russ.)

3. Mingzhong Zhang, Jivkov AP. Micromechanical Modelling of Deformation and Fracture of Hydrating Cement Paste Using X-ray Computed Tomography Characterization. *Composites Part B: Engineering*. 2016;88:64–72. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.007

4. Lavrov A, Panduro EAC, Torsæter M. Synchrotron Study of Cement Hydration: Towards Computed Tomography Analysis of Interfacial Transition Zone. *Energy Procedia*. 2017;114:5109–5117. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1666

5. Иноземцев А.С. Средняя плотность и пористость высокопрочных легких бетонов. *Инженерно-строительный журнал*. 2014;51(7):31–37. https://doi.org/10.5862/MCE.51.4

Inozemtsev AS. Average Density and Porosity of High-Strength Lightweight Concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2014;51(7):31–37. (In Russ.) https://doi.org/10.5862/MCE.51.4

6. Осипов С.П., Прищепа И.А., Кудяков А.И., Батранин А.В., Осипов О.С. Компьютерная томография пенобетона. *Системы. Методы. Технологии.* 2018;38(2):146–152. https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-146-152

Osipov SP, Prishchepa IA, Kudyakov AI, Batranin AV, Osipov OS. Computer Tomography of Foam Concrete. *Systems. Methods. Technologies.* 2018;38(2):146–152. https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-146-152

7. Tuan Nguyen, Abdallah Ghazlan, Alireza Kashani, Stćphane Bordas, Tuan Ngo. 3D Meso-Scale Modelling of Foamed Concrete Based on X-ray Computed Tomography. *Construction and Building Materials*. 2018;188:583–598. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.085

8. Haizhu Lu, Eugene Alymov, Sanjay Shah, Karl Peterson. Measurement of Air Void System in Lightweight Concrete by X-ray Computed Tomography. *Construction and Building Materials*. 2017;152:467–483. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.180

9. Хузин А.Ф., Рахимов Р.З. Влияние многослойных углеродных нанотрубок на пористость цементного камня. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016;37(3):231–237.

Khuzin AF, Rahimov RZ. The Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on the Porosity of the Cement Stone. *News KSUAE*. 2016;37(3):231–237.

10. Sang-Yeop Chung, Mohamed Abd Elrahman, Dietmar Stephan, Paul H Kamm. The Influence of Different Concrete Additions on the Properties of Lightweight Concrete Evaluated Using Experimental and Numerical Approaches. *Construction and Building Materials*. 2018;189:314–322. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.189

11. Yujie Huang, Zhenjun Yang, Wenyuan Ren, Guohua Liu, Chuanzeng Zhang. 3D Meso-Scale Fracture Modelling and Validation of Concrete Based on In-situ X-ray Computed Tomography Images Using Damage Plasticity Model. *International Journal of Solids and Structures*. 2015;67–68:340–352. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.05.002

12. Левандовский А.Н., Мельников Б.Е., Шамкин А.А. Моделирование пористого материала методом конечных элементов. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017;53(2):61–77. https://doi.org/10.18720/CUBS.53.5

Levandovskiy AN, Melnikov BE, Shamkin AA. Porous Material Modeling with Finite Element Method. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017;53(2):61–77. https://doi.org/10.18720/CUBS.53.5

13. Большаков В.И., Елисеева М.А., Щербак С.А. Контактная прочность механоактивированных мелкозернистых бетонов из доменных гранулированных шлаков. *Наука та прогрес транспорту*. 2014;53(5):138–149.

Bolshakov VI, Yelisieieva MO, Shcherbak SA. Contact Strength of Mechanoactivated Fine Concretes from Granulated Blast-Furnace Slags. *Nauka ta progres transportu*. 2014;53(5):138–149. (In Russ.)

14. Егорочкина И.О., Серебряная И.А., Шляхова Е.А., Матросов А.А., Пронина К.А., Кузина А.Н. Исследование структуры контактной зоны в бетонах с комбинированными заполнителями. *Инженерный вестник Дона*. 2019;55(4):40.

Egorochkina IO, Serebryanaya IA, Shlyakhova EA, Matrosov AA, Pronina KA, Kuzina AN. Study of the Structure of the Contact Zone in Concretes with Combined Aggregates. *Engineering Journal of Don*. 2019;55(4):40.

15. Бедарев В.В., Бедарев Н.В., Бедарев А.В. Разрушение бетона в контактном слое на основе базовых положений общей теории сцепления и анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне. В: *Сборник тезисов докладов Международного строительного конгресса «Наука. Инновации. Цели. Строительство»*. Москва: АО «НИЦ «Строительство»; 2023. С. 39–43. https://doi.org/10.37538/2949-219%D0%A5-2023-39-43

Bedarev VV, Bedarev NV, Bedarev AV. The Destruction of Concrete in the Contact Layer Based on the Basic Provisions of General Theory of Adhesion and Anchoring of Periodic Profile Reinforcement in Concrete. In: *Proc. International Construction Congress "Science. Innovations. Goals. Construction"*. Moscow: Research Center of Construction; 2023. P. 39–43. (In Russ.) https://doi.org/10.37538/2949-219%D0%A5-2023-39-43

16. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Смирнова О.Е. Пименов Е.Г. Трещинообразование в крупнопористом бетоне с интегральным расположением крупного заполнителя. *Эксперт: теория и практика*. 2020;7(4):47–52. https://doi.org/10.24411/2686-7818-2020-10035

Pichugin AP, Khritankov VF, Smirnova OE, Pimenov EG. Crack Formation in Large-Porous Concrete with an Integral Arrangement of a Large Filler. *Expert: Theory and Practice*. 2020;7(4):47–52. (In Russ.)

17. Пшеничный Г.Н. Об особенностях формирования контактной зоны цементных бетонов. *Технологии бетонов*. 2015;110–111(9–10):56–60.

Pschenichniy GN. About the Features of Cement Concrete Surface Area. *Concrete Technologies*. 2015;110–111(9–10):56–60.

18. Дмитриева М.А., Шаранова А.В., Панфилова А.Д., Плахтий А.А. Реологические свойства строительных растворов, применяемых для 3D-печати. В: *Труды конференции «Современные строительные материалы и технологии»*. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта; 2019. С. 18–32.

Dmitrieva MA, Sharanova AV, Panfilova AD, Plakhtiy AA. Rheological Properties of Building Mortars Used for 3D Printing. In: *Proc. International Conference "Advanced Building Materials and Technologies"*. Kaliningrad: IKBFU Publ.; 2019. P. 18–32. (In Russ.)

19. Шаранова А.В., Дмитриева М.А., Лейцин В.Н. Обеспечение безопалубочного формования бетонных строительных конструкций аддитивными технологиями. В: *Труды II международной конференции «Современные строительные материалы и технологии»*. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта; 2020. С. 15–21.

Sharanova AV, Dmitrieva MA, Leitsin VN. Ensuring Formation of Concrete Building Constructions without Formwork by Additive Technologies. In: *Proc. II International Conference "Advanced Building Materials and Technologies"*. Kaliningrad: IKBFU Publ.; 2020. P. 15–21.

20. Dvorak G.J. *Micromechanics of Composite Materials. Series: Solid Mechanics and Its Applications*. Dordrecht: Springer; 2013. 442 p. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4101-0

21. Лейцин В.Н., Дмитриева М.А., Ивонин И.В. Пономарев С.В., Полюшко В.А. Товпинец А.О. и др. Определяющие факторы формирования структуры низкотемпературной керамики. *Физическая мезомеханика*. 2017;20(6):77–85.

Leitsin VN, Dmitrieva MA, Ivonin IV, PonomarevSV, Polyushko VA, Tovpinets AO, et al. Determining Factors of the Formation of the Structure of Low-Temperature Ceramics. *Physical Mesomechanics*. 2017;20(6):77–85. (In Russ.)

Об авторах:

Анастасия Вячеславовна Пузатова, заведующий лабораторией строительных материалов, старший преподаватель образовательно-научного кластера института высоких технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), SPIN-код, ORCID, ScopusID, a.v.puzatova@mail.ru

Мария Александровна Дмитриева, доктор физико-математических наук, профессор образовательно-научного кластера института высоких технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), SPIN-код, ORCID, ScopusID, dmitrieva_m@inbox.ru

Александр Олегович Товпинец, научный сотрудник образовательно-научного кластера института высоких технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ATovpinets@mail.ru

Владимир Нояхович Лейцин, доктор физико-математических наук, профессор образовательно-научного кластера Институт высоких технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), SPIN-код, ORCID, ScopusID, leitsin@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А.В. Пузатова: проведение экспериментов, интерпретация результатов, оформление научной статьи.

М.А. Дмитриева: постановка задачи, научное сопровождение.

А.О. Товпинец: проведение эксперимента на томографе, обработка изображений, описание теоретической части исследований.

В.Н. Лейцин: редактирование статьи, формулировка выводов, научное сопровождение.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Anastasiia V. Puzatova, Head of the Laboratory of Construction Materials, Senior Lecturer of the Education and Research Cluster, Institute of High Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, Alexander Nevsky Str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, a.v.puzatova@mail.ru

Maria A. Dmitrieva, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Education and Research Cluster, Institute of High Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, Alexander Nevsky Str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, dmitrieva_m@inbox.ru

Alexandr O. Tovpinets, Researcher of the Education and Research Cluster, Institute of High Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, Alexander Nevsky Str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ATovpinets@mail.ru

Vladimir N. Leitsin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Education and Research Cluster, Institute of High Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, Alexander Nevsky Str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, leitsin@mail.ru

Claimed Contributorship:

AV Puzatova: conducting experiments, interpreting the results, preparing the scientific article.

MA Dmitrieva: problem statement, scientific support.

AO Tovpinets: conducting an experiment on a tomograph, processing images, describing the theoretical part of the research.

VN Leitsin: article editing, conclusion formulation, scientific support.

Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 07.06.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 02.07.2024
Принята к публикации / Accepted 10.07.2024